

# 下降管式生物质快速热解反应器温度场控制与检测\*

崔喜彬 李志合 易维明 柏雪源 徐士振 程卫东

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**【摘要】** 下降管式生物质快速热解器内部温度场的准确控制与测量,是影响生物质快速热解挥发性的一个关键因素。为了研究物质快速热解挥发特性,设计制作了下降管式生物质快速热解反应器及其温度场的控制与检测系统,并且利用该反应器进行了玉米秸秆粉末快速热解挥发特性实验。实验结果表明,该实验装置能够对反应温度进行准确控制和测量;玉米秸秆粉的热解挥发率随热解温度的升高、停留时间的增加呈非线性增大。

**关键词:** 生物质快速热解反应器 下降管 温度 测量 控制

**中图分类号:** TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)S0-0133-04

## Control and Measurement of Temperature Field in a Down-flow Tube Reactor

Cui Xibin Li Zhihe Yi Weiming Bai Xueyuan Xu Shizhen Cheng Weidong

(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

### Abstract

In order to study the volatilization characteristics of biomass, a downward-flow tube reactor with a temperature control and measurement system was designed and fabricated. Corn stalk powder pyrolysis experiments were conducted and the experimental results showed that the reaction temperature could be controlled and measured precisely; the volatilized fraction of corn stalk powder increased nonlinearly with increased reaction temperature and residence time.

**Key words** Biomass fast pyrolysis reactor, Downward tube, Temperature, Measurement, Control

### 引言

热解是生物质材料进行热化学转换的第一步,它受热解温度、停留时间、加热速率、生物质特性和粒径等诸多因素的影响<sup>[1-5]</sup>。国内外许多学者利用热重仪(TGA)研究了不同种类生物质的热解特性,但是TGA适用于慢速程序升温的热解过程,其结果不能直接应用于快速热解液化研究<sup>[6-8]</sup>。利用固体热载体与生物质颗粒之间的温差实现生物质颗粒的快速升温热解,具有较高的传热效率和液体转化率,相对于流化床工艺,该工艺无需引入其他惰性气体介质,不但节约成本,而且大大降低了冷却系统的负

荷,节约了能耗,并且陶瓷球可以循环利用。本文主要设计制作下降管式生物质快速热解反应器及其温度场的控制与检测系统,进行玉米秸秆在下降管内的热裂解实验,以得出玉米秸秆粉的热解挥发率随热解温度和停留时间的关系。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验装置

生物质热解挥发实验要求下降管反应器内部均匀一致,并且要保证下降管内部温度场的稳定,以减少实验误差。根据这一要求设计了可控硅触发陶瓷器内部加热、下降管外壁分段式保温的下降管生物

质快速热解特性反应器,并且制作了控制柜,用仪表显示实验过程中电流和电压。它的基本结构如图1所示,基本工作原理是陶瓷球被预热到一定温度后通过流量控制阀进入下降管和由喂料器喂入的生物质粉末发生热解反应,然后利用残炭取样系统把在某种工况下发生热解的生物质残炭收集在集炭器里,进而研究其热解特性。为了验证实验的可靠性和重复性,在该装置上进行了反应温度为450、500、550℃,下降距离为150、550、850、1150 mm时玉米秸秆粉末的热挥发实验,利用灰分失踪法计算得到玉米秸秆的挥发率,并对温度场进行了实时检测。

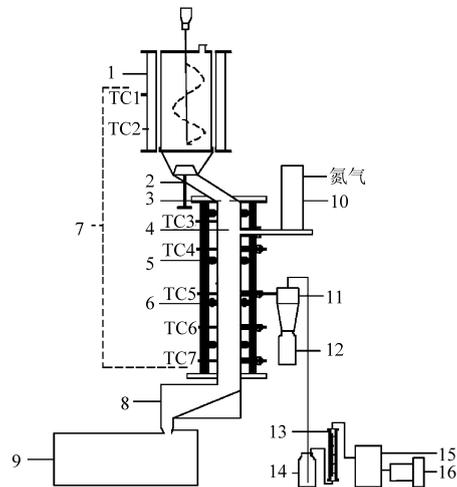


图1 陶瓷球固体热载体下降管式生物质热解特性实验装置结构

Fig. 1 Sketch of ceramic ball in heated down ward-flowing tube for pyrolysis characteristics of biomass

1. 陶瓷球加热器 2. 陶瓷球流量开关 3. 陶瓷球流量控制板
4. 下降管反应器 5. 电热丝 6. 保温材料 7. 温度测控系统
8. 陶瓷球残炭分离箱 9. 陶瓷球收集箱 10. 生物质喂料器
11. 旋风分离器 12. 集炭器 13. 转子流量计 14. 过滤器
15. 稳压罐 16. 抽气风机

## 1.2 温度场控制

下降管生物质快速热解器内部温度场的测量与控制,是准确控制生物质快速热挥发实验条件的一个关键因素。温度场的控制包括陶瓷球加热器温度场控制和下降管反应器内温度场控制,实验采用热电偶和具有程序自整定功能PID控温仪表进行控温。实验时预热陶瓷球温度稳定在设定值,同时控制下降管温度到同样设定值,通过协调下降管两部分的温度,可使下降管反应器内部温度场均匀一致,提高了实验精度。

### 1.2.1 陶瓷球加热器温度场的控制

由于陶瓷球固体热载体热惯性大,温度变化较缓慢,容易造成温度不均。局部温度过高会损坏设备并且陶瓷球过热容易产生结渣现象,影响陶瓷球下料,所以陶瓷球加热采用硅碳棒内部加热,并且加

热过程中用双设定时间继电器控制陶瓷球加热器中间的螺旋搅拌器每隔10 min搅拌一次,将中心区域陶瓷球向上提升,外侧陶瓷球在重力作用下向下滚动,从而保证陶瓷球受热均匀,避免局部温度过高。加热陶瓷球的硅碳棒插放在加热器内部均匀布置的9根保护套管内,保护套管和硅碳棒间使用耐高温绝缘陶瓷管,结构示意图如图2所示。陶瓷球加热器外面用硅酸铝隔热耐高温棉保温,减少热量的散失。温度的控制通过安放在陶瓷球加热器下部1.2.2 下降管内温度场的控制

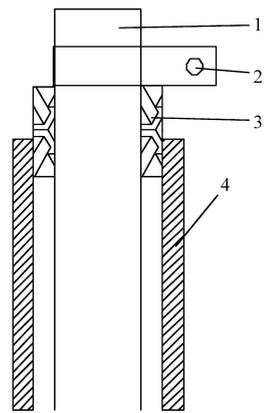


图2 硅碳棒保护结构示意图  
示意图示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the silicon carbide heater protection

1. 硅碳棒 2. 接线端子 3. 绝
- 缘陶瓷管 4. 保护套管

### 1.2.2 下降管内温度场的控制

实验过程中生物质粉末在下降管内发生热解反应需要吸收热量,并且下降管下端的陶瓷球残炭分离箱会有部分热量的散失,导致下降管下端温度偏低,为了保证下降管反应器内部温度场的均匀稳定,在下降管外壁采用电热丝分段式辅助保温。温控仪表输出方式为可控硅单项调压方式,可以通过调节温控仪表的限幅值改变加热的功率。反应器外面用硅酸铝隔热耐高温棉保温,以减少热解过程中热量的散失。下降管内温度控制由安放在下降管的控温热电偶TC2和TC4进行控温。

### 1.3 热载体加热

加热陶瓷球的硅碳棒每根阻值为2.3Ω,3根串联为一相,加热方式为380V三相Y型。预热实验过程中用仪表指示电路中的电压和电流。电炉丝选用直径为1.5 mm镍铬材料,电炉丝上穿有直径为2 mm的绝缘陶瓷珠。第一段电炉丝的阻值为20Ω,第二段电炉丝的阻值为15Ω,其原理如图3所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度场检测及结果

实验中温度的检测采用专用版组态软件和热电偶数据采集板卡采集RM410,用RM410采集温度数据,用组态软件记录数据,整个过程由组态软件实时监控。陶瓷球加热器上的测温位置TC1位于陶瓷

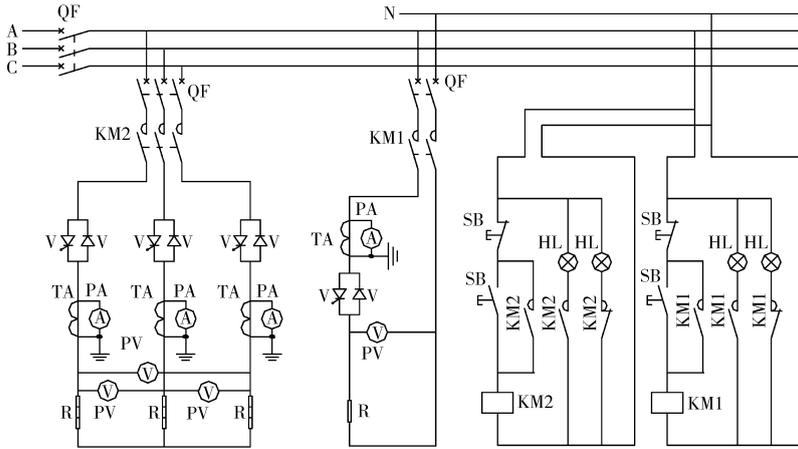


图3 加热原理接线图

Fig. 3 Key wiring diagram

球加热器中部,下降管测温位置为 TC3、TC5、TC7, 实验数据如图4所示。

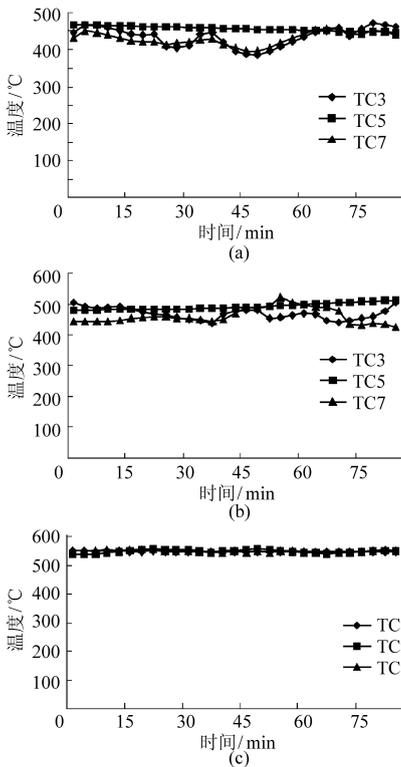


图4 下降管测温点温度值

Fig. 4 Temperature of each measured point

(a) 450°C (b) 500°C (c) 550°C

## 2.2 快速热解实验结果及分析

影响热裂解的参数较多,实验考虑了热解温度和停留时间对40~46目玉米秸秆粉挥发率的影响。在450、500、550°C温度和150、550、850、1150 mm反应距离进行快速热解挥发特性实验,玉米秸秆粉末进料速率9.4 g/min,陶瓷球进料速率1.40 kg/min,风机抽气量为1.5 m<sup>3</sup>/h,氮气表头流量5 m<sup>3</sup>/min。

通过陶瓷球和生物质半焦在竖直管内的PIV流动实验可知,当抽气量小于11 m<sup>3</sup>/h,抽气量对生物

质半焦在竖直管内的速度几乎没有影响,生物质半焦刚进入竖直管内在重力的作用下有一个加速的过程,时间很短,当达到受力平衡后生物质半焦的速度保持不变,取生物质半焦在竖直管内的平均速度为0.78 m/s<sup>[9]</sup>。

生物质颗粒进入反应器内以后,在50 mm处就可以达到设定热解温度<sup>[10]</sup>,并且维持该温度不变,也就是说玉米秸秆粉末是在恒定温度下发生热裂解反应。升温速率由各工况下生物质粉末在50 mm距离内从初始温度升高到反应设定温度所用的时间计算得出。表1给出了玉米秸秆粉在各种实验工况。

表1 玉米秸秆粉热解实验工况

Tab. 1 Experimental parameters of the fast pyrolysis experiment for corn stalk

反应温度/°C	下降距离/mm	挥发停留时间/ms	升温速率/°C·s <sup>-1</sup>
450	150	192.3	6.6 × 10 <sup>-3</sup>
	550	705.1	6.6 × 10 <sup>-3</sup>
	850	1 089.7	6.6 × 10 <sup>-3</sup>
	1 150	1 474.4	6.6 × 10 <sup>-3</sup>
500	150	192.3	7.4 × 10 <sup>-3</sup>
	550	705.1	7.4 × 10 <sup>-3</sup>
	850	1 089.7	7.4 × 10 <sup>-3</sup>
	1 150	1 474.4	7.4 × 10 <sup>-3</sup>
550	150	192.3	8.2 × 10 <sup>-3</sup>
	550	705.1	8.2 × 10 <sup>-3</sup>
	850	1 089.7	8.2 × 10 <sup>-3</sup>
	1 150	1 474.4	8.2 × 10 <sup>-3</sup>

实验过程以500°C、100 mm为例:开冷凝水,预热陶瓷球和下降管内气体,当温度稳定在500°C,旋

转陶瓷球流量开关喂入陶瓷球,通过温度采集系统观察下降管温度,当下降管温度场均匀稳定后,通氮气,启动生物质喂料器喂入生物质粉,生物质粉和热的陶瓷球在下降管反应器内发生快速热解反应,启动抽气风机,气相和热解残炭在残炭采样口被抽出,利用旋风分离器的分离作用把热解的生物质残炭收集在集炭器里,直到收集足够的残炭,再进行下一个位置的取样,而气相还要经过过滤器、转子流量计和稳压灌。流量计用于显示抽气量;过滤器的作用是过滤生物质热解过程中产生的生物油和部分残炭,避免生物油和残炭进入流量计,影响流量计精度;稳压罐起到稳定气压的作用。

由于实验过程中残炭不能完全取样,而且旋风分离器的效率不是百分之百,所以生物质热解挥发率只能采用灰分示踪法<sup>[11-12]</sup>计算得到,实验所用玉米秸秆原料灰分含量为17.9%,玉米秸秆在不同工况下热裂解挥发率结果如图5所示。

### 3 结论

(1) 下降管生物质快速热解特性反应器,能够实现下降管式生物质快速热解反应器内部温度场的准确控制与测量。

(2) 玉米秸秆粉的热解挥发率随着热解温度的升高、下降距离的增加呈非线性增大。

### 参 考 文 献

- 李志合,刘焕卫,高巧春,等. 垂直下降管散体颗粒换热试验台的设计与应用[J]. 农业机械学报,2009,40(1):100~104.  
Li Zhihe, Liu Huanwei, Gao Qiaochun, et al. Design and downward vertical tube for heat transfer of particles [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (1): 100 ~ 104. (in Chinese)
- 姚建中,陈洪章,张均荣,等. 玉米秸秆快速热解[J]. 化工冶金, 2000, 21 (4) : 434 ~ 437.  
Yao Jianzhong, Chen Hongzhang, Zhang Junrong, et al. Fast pyrolysis of corn straw [J]. Engineering Chemical & Metallurgy, 2000, 21 (4): 434 ~ 437. (in Chinese)
- Xiu S N, Yi W M, Li B M. Flash pyrolysis of agricultural residues using a plasma heated laminar entrained flow reactor [J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 29(2): 135 ~ 141.
- Putun A E, Apaydm E, Putun E. Rice-straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis [J]. Energy, 2004, 29(12 ~ 15): 2 171 ~ 2 180.
- Yagi S, Kunii D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds [J]. AIChE Journal, 1957, 3 (3): 373 ~ 381.
- Guo J, Lua A C. Kinetics study on pyrolytic of oil-palm solid waste using two-step consecutive reaction mode [J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 20(3): 223 ~ 233.
- 刘铁峰,房倚天,王洋. 煤高温快速热解规律研究[J]. 燃烧化学学报,2009,37(1):20~25.  
Liu Tiefeng, Fang Yitian, Wang Yang, et al. Rapid pyrolysis of coal at high temperature [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37 (1): 20 ~ 25. (in Chinese)
- 杨海平,陈汉平,晏蓉,等. 温度对生物质固定床热解影响的研究[J]. 太阳能学报,2007,28(10):1 152~1 157.  
Yang Haiping, Chen Hanping, An Rong, et al. The influence of temperature on biomass pyrolysis in fixed bed [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28 (10): 1 152 ~ 1 157. (in Chinese)
- 殷哲. 管内陶瓷球与粉状生物质半焦颗粒流动特性的研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2009.  
Yin Zhe. The study on flowing properties of spherical particles and biomass chars in a tube [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009. (in Chinese)

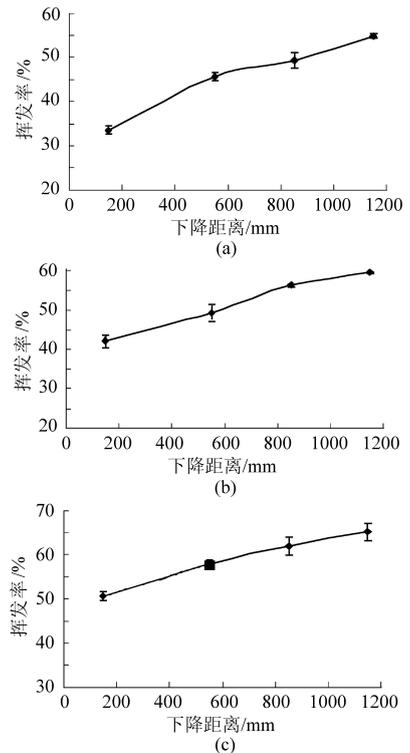


图5 生物质挥发率与下降距离的关系曲线  
Fig. 5 Volatilized fractions of biomass vs different reaction distances  
(a) 450°C (b) 500°C (c) 550°C

$Nu_b$  和  $Re_b$  数具有较好的线性关系。

#### 4 结束语

在下降管散体颗粒换热实验台上,以陶瓷球质量流量分别为 1.0、1.2、1.4 kg/min 进行了陶瓷球与空气(代替热解气)的对流换热实验。在前述陶瓷球流量下,以陶瓷球与生物质粉质量比分别为 15:1、20:1、25:1 3 种工况进行了陶瓷球热载体、生物质粉

与空气的多相传热实验。采用解析法和关联式法分析出了单陶瓷球颗粒与空气的对流换热系数,分别为  $291.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$  和  $200.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。采用热平衡方法分析得出了陶瓷球热载体颗粒群和生物质颗粒群的无量纲换热准则方程分别为  $Nu_c = 176 + 0.079Re_c$  和  $Nu_b = 22.97 + 0.2251Re_b$ ,为生物质热解规律的研究提供了传热理论基础。

#### 参 考 文 献

- 傅利华,郑典模,孙云. 生物质快速热解液化技术的研究进展[J]. 江西化工,2007(2):45~49.  
Fu Lihua, Zheng Dianmo, Sun Yun. Research progress in biomass flash pyrolysis technology for liquids production[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2007(2): 45~49. (in Chinese)
- Bridgwater A V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999, 51(1): 3~22.
- 戴天红,钱壬章,李宏顺. 循环流化床的传热机理——颗粒絮团更新模型[J]. 燃烧科学与技术, 1997,3(3):270~279.  
Dai Tianhong, Qian Renzhang, Li Hongshun. Heat transfer mechanism in circulating fluidized beds—cluster renewal model [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997,3(3): 270~279. (in Chinese)
- 刘安源,刘石. 流化床内颗粒碰撞传热的理论研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):161~165.  
Liu Anyuan, Liu Shi. Theoretical study on impact heat transfer between particles in fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 161~165. (in Chinese)
- 孔行健,孙国刚,王茂辉. 大差异颗粒气固流化床传热特性实验研究[J]. 炼油技术与工程,2008,38(3):18~23.  
Kong Xingjian, Sun Guogang, Wang Maohui. Experimental investigation on heat transfer behavior of greatly different particles in gas solid fluidization bed[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2008, 38(3): 18~23. (in Chinese)
- 李志合,易维明,刘焕卫,等. 垂直下降管内陶瓷球流动与传热的试验[J]. 农业工程学报,2009,25(2):72~76.  
Li Zhihe, Yi Weiming, Liu Huanwei, et al. Experimental study on the flow behavior and heat transfer of ceramic balls in a vertical descendant tube[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 72~76. (in Chinese)
- Mansoori Z, Saffar-Avval M, Basirat Tabrizi H, et al. Inter-particle heat transfer in a riser of gas-solid turbulent flows[J]. Powder Technology, 2005, 159(1): 35~45.
- Papadikis K, Gerhauser H, Bridgwater A V, et al. CFD modeling of the fast pyrolysis of an in-flight cellulosic particle subjected to convective heat transfer[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(1): 97~107.
- 李志合. 下降管内反应器内生物质热裂解规律的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2010.  
Li Zhihe. Principles of biomass pyrolysis in down flow tube reactor[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese)

(上接第 136 页)

- 陈彩霞,孙学信,张小可. 层流曳带流反应器内流动和温度特性的数值模拟[J]. 华中理工大学学报,1994,22(3): 30~35.  
Chen Caixia, Sun Xuexin, Zhang Xiaoke. Numerical modeling of flow and particle heating in a reactor with laminar entrained flow[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech., 1994, 22(3): 30~35. (in Chinese)
- 易维明,柏雪源,李志合,等. 玉米秸秆粉末闪速解热挥发特性的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):246~250.  
Yi Weiming, Bai Xueyuan, Li Zhihe, et al. Investigation of de-volatilization characteristics of pulverized corn stalk at flash heating rate[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 246~250. (in Chinese)
- 易维明,王丽红,柏雪源,等. 层流炉温度的检测与控制[J]. 可再生能源,2004(115):15~17.  
Yi Weiming, Wang Lihong, Bai Xueyuan, et al. Temperature measurement and control in a laminar furnace[J]. Renewable Energy, 2004(115): 15~17. (in Chinese)